



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

Schlussbericht 18.09.2018

---

# **Integrierte 3 kW Kompressor-Elektronik zur Reduktion der Komplexität und Steigerung des Balance of Plant in Brennstoffzellen- Systemen**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Energieforschung  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Celeroton AG  
Industriestrasse 22  
CH-8604 Volketswil  
[www.celeroton.com](http://www.celeroton.com)

**Autoren:**

Christof Zwysig, Celeroton AG, [christof.zwysig@celeroton.com](mailto:christof.zwysig@celeroton.com)  
Martin Bartholet, Celeroton AG, [martin.bartholet@celeroton.com](mailto:martin.bartholet@celeroton.com)

<b>BFE-Bereichsleiter:</b>	Stefan Oberholzer
<b>BFE-Programmleiter:</b>	Stefan Oberholzer
<b>BFE-Vertragsnummer:</b>	SI/501407-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Ausgangslage

## Hintergrund

Anstrengungen zur Förderung erneuerbarer Energien und der Reduktion der Umweltbelastung führen zu verstärkter Forschung im Bereich Brennstoffzellen, speziell für Antriebssysteme für Kleinlastwagen für die Paket- und Briefzustellung, Gabelstapler, Reinigungsfahrzeuge, aber auch zur Initiierung zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich PKW. Weitere Anwendungsgebiete für Brennstoffzellen finden sich in Hilfsbetriebsversorgungen für Flugzeuge und LKW's oder auch als Ersatz für Batterien für den portablen Einsatz. Zahlreiche Schweizer Firmen und Forschungsinstitutionen betreiben auf diesem Gebiet Forschung und Entwicklung um die Herstellungskosten der Brennstoffzellenstacks- und systeme zu reduzieren und die Effizienz zu steigern. Damit wird auch der Druck immer grösser die Kosten der Zusatzkomponenten, auch als Balance of Plant (BoP) bezeichnet, zu senken und den Wirkungsgrad der Zusatzkomponenten zu steigern. Insbesondere betrifft dies das Kompressorsystem für die Luftversorgung der Brennstoffzelle, welches in gegenwärtigen Systemen 10 – 20 % der Ausgangsleistung der Brennstoffzelle verbraucht, und einen Grossteil des Volumens und Gewichts und auch der Kosten des Brennstoffzellensystems, und insbesondere der BoP, ausmacht.

Im Automobilbereich und allgemein im Bereich der Mobilität unterscheiden sich die benötigten Leistungsdaten der Brennstoffzellensysteme folgendermassen:

- 60 - 120 kW: Brennstoffzellenkapazität für volle Antriebsleistung (Kompressorsystem mit 10 – 20 kW Leistung)
- 30 - 50 kW: Hybride Elektro- (Batterie) und Brennstoffzellenfahrzeuge (PKW, Gabelstapler, Kleinlastwagen, Reinigungsfahrzeuge, etc.) (Kompressorsystem mit 3 – 5 kW Leistung)
- 5 - 15 kW: Hilfsantrieb (Range Extender) für Elektrofahrzeuge (Batterie) und Gabelstapler, Kleinlastwagen, Reinigungsfahrzeuge, etc. (Kompressorsystem mit 0.5 – 2 kW Leistung)

## Stand der Technik

Neben dem Kompressor muss bei der Gesamtbetrachtung des BoP in Brennstoffzellen-Systemen auch die Elektronik zur Ansteuerung des Kompressors betrachtet werden. Aktuell sind dafür mehrere Elektroniken verbaut. Zum einen der eigentliche Antriebsumrichter mit konstanter Eingangsspannung für den Kompressor. Weiter ein DCDC-Konverter für die Speisung der konstanten Eingangsspannung des Antriebsumrichters ab einer variablen Batteriespannung (Hochspannung) sowie ein weiterer DCDC-Konverter zur Speisung der konstanten Ausgangsspannung des Antriebsumrichters ab Batterie für den Startvorgang, gezeigt in Abbildung 1. Diese drei Komponenten können mit einer einzigen anwendungsspezifischen Kompressor-Ansteuerelektronik abgedeckt werden, gezeigt in Abbildung 2.

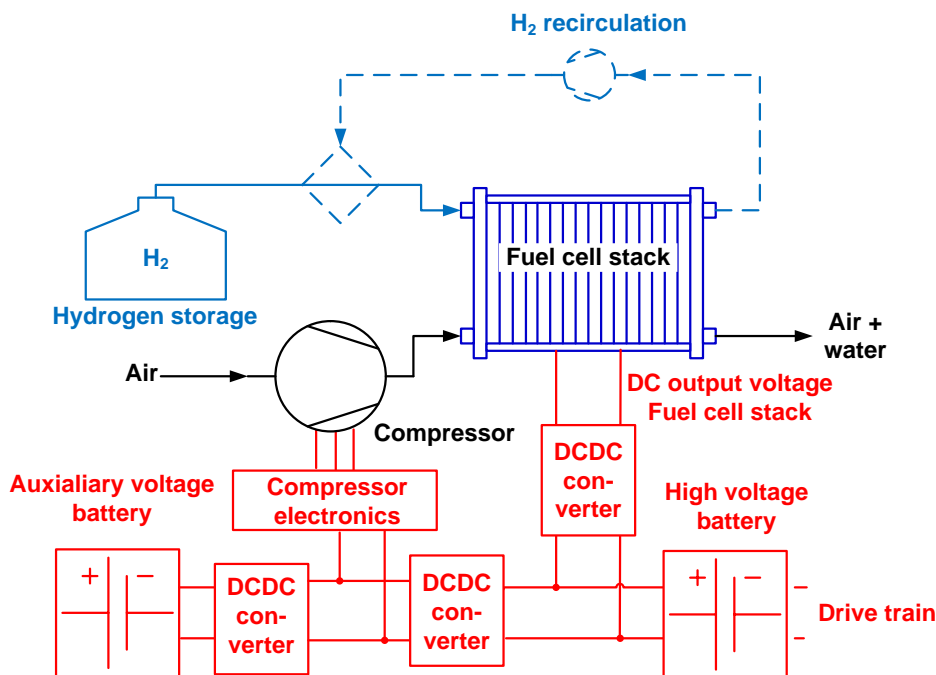


Abbildung 1: BoP eines Brennstoffzellen-Systems im Bereich 30-50 kW inklusive Kompressor-Ansteuerelektronik und drei DCDC Konvertern.

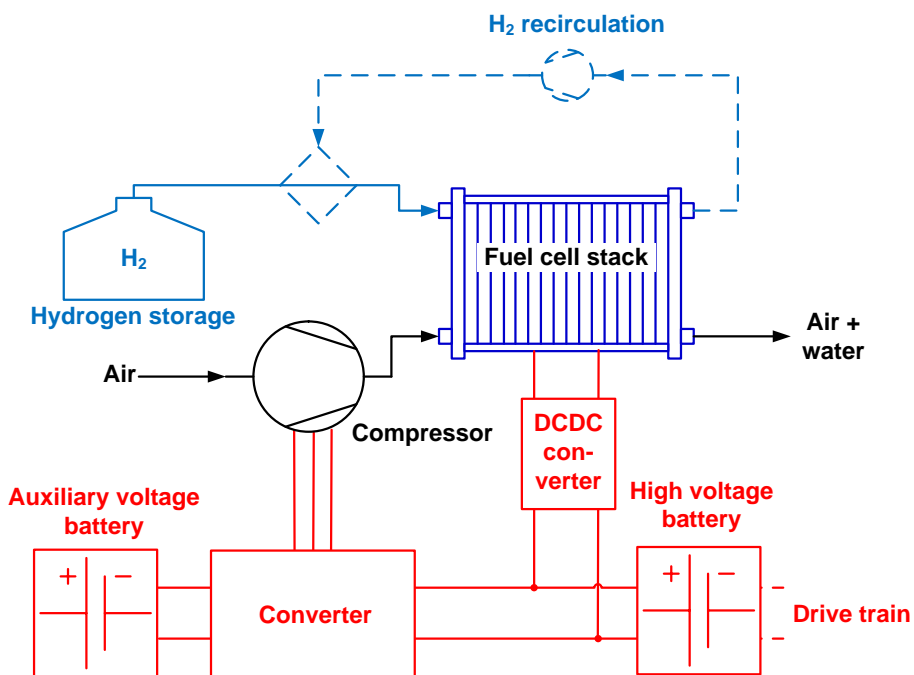


Abbildung 2: BoP eines Brennstoffzellen-Systems im Bereich 30-50 kW mit einem DCDC-Konverter und einer einzigen anwendungsspezifischen Kompressor-Ansteuerelektronik („Converter“).

Das Energieeinsparungspotential und die Reduktion der Komplexität von verschiedenen Konzepten und Lösungen auf Elektronikseite wurde bisher in Forschungs- und Entwicklungsprojekten nicht oder nur wenig untersucht. Eine Reduktion der Anzahl Elektronik bedeutet eine Reduktion der Komplexität des Balance of Plant. Weniger einzelne Elektronik bedeuten aber auch eine Effizienzsteigerung des Balance of Plant und damit des gesamten BZ-Systems und damit einhergehend eine Steigerung der Reichweite von BZ-Fahrzeugen. Weiter können auch die Kosten gesenkt werden, da weniger Elektronikkomponenten sowie Kabel und Stecker verbaut werden müssen.

- Für eine vereinfachte Beispielrechnung kann angenommen werden, dass der Kompressor 10% der Brennstoffzellenleistung verbraucht, für ein 30 kW Brennstoffzellen-System also

3 kW. Im typischen Brennstoffzellensystem fliesst diese Kompressor-Leistung durch zwei Elektroniken (den DCDC-Konverter zwischen Brennstoffzellen-Ausgangsspannung und konstanter Eingangsspannung des Antriebsumrichters, und von da weiter über den Antriebsumrichter auf den Kompressor). Für beide Elektroniken kann ein mittlerer Wirkungsgrad von 90% (Teillast bis Vollastbetrieb) angenommen werden. Wenn eine Elektronik ersetzt werden kann spart dies also 10% Kompressorleistung, was 0.3 kW entspricht, und somit 1% Wirkungsgrad des gesamten Brennstoffzellensystems. Zudem kann das Volumen und Gewicht des BZ-Systems reduziert werden. Bei gleichbleibender Fahrdistanz kann über eine Laufzeit von 3'000 h somit 900 kWh Energie eingespart werden. Wird die Erzeugung (Elektrolyse, ca. 70% Wirkungsgrad) und Umwandlung von Wasserstoff (Brennstoffzelle, ca. 50%) miteinberechnet steigt die Energieeinsparung aus der Steckdose auf 2'600 kWh pro umgerüstetem BoP.

## Motivation des Projektes

Anhand eines Beispiel-Kompressor Systems soll das Potential der Energieeinsparung und der Reduktion der Komplexität durch eine an Brennstoffzellenanforderungen angepasste Elektronik aufgezeigt werden. Als Beispiel-Kompressor System wird folgendes gewählt:

- Turbo Kompressor-Technologie: In [1], [2] und dem abgeschlossenen BfE Projekt SI/501296-01 werden die Vorteile der Turbo Kompressor-Technologie gegenüber anderen Kompressor Arten aufgezeigt.
- Kompressor System für 30 kW Brennstoffzellen-Stack: Diese Brennstoffzellenleistung verspricht grosses wirtschaftliches Potential. Es wird eine anwendungsspezifische Elektronik benötigt, da die Batteriespannung und Leistung (im Gegensatz zu tieferen Brennstoffzellenleistungen) nicht mehr ausreicht um das Kompressor System direkt zu versorgen. Zudem ist der höhere Aufwand auf Seite anwendungsspezifische Elektronik gerechtfertigt dank höherem Potential der Energieeinsparung und der Komplexitätsreduktion.

Die Resultate dieses Beispiel-Kompressor-Systems sind auch übertragbar auf:

- Andere Kompressor Typen: Je schlechter der Kompressor Wirkungsgrad, desto höher ist das Potential der Energieeinsparung mit angepasster Elektronik. Bei grosser Abweichung des Kompressor Wirkungsgrades ist allerdings eine Anpassung der Elektronik nötig, da die Elektronikleistung proportional zum Kompressor Wirkungsgrad skaliert.
- Andere Brennstoffzellenleistung: Je grösser die Brennstoffzellenleistung, desto grösser ist das absolute Potential der Energieersparnis mit angepasster Elektronik. Eine Elektronik pro Brennstoffzellenklasse (60 - 120 kW; 30 - 50 kW; 5 - 15 kW) ist nötig.

## Ziele der Arbeit

Das erste Projektziel ist die Realisierung einer Prototyp-Elektronik für die Ansteuerung eines 3 kW Kompressors ab einer variablen Batterie-Spannung sowie einer Batteriespannung als Auxiliary supply für den Control-Teil der Elektronik gemäss Tabelle 2.

Das zweite Projektziel ist ein gemessener Gesamtwirkungsgrad von über 90% beim Betrieb des Prototypen im Nennarbeitsbereich des Kompressors, respektive der Brennstoffzelle.

Das dritte Projektziel ist ein anschaulicher Vergleich der Komplexität der heute üblicherweise eingesetzten Lösung bestehend aus mehreren Elektroniken mit einer an Brennstoffzellenanforderungen angepassten Elektronik.

	Stand übliche industrielle Lösung	Stand bestehende Lösung von Celeroton (CC-230-3500)	Stand bestehende Lösung von Celeroton (CC-120-1000)	Zielspezifikation in diesem BfE Projekt
				
<b>Versorgungsspannung</b>	48 Vdc	110-240 Vac	40-120 Vdc	324 - 440 Vdc (Nennspannung 390 Vdc)
<b>Nominale/Spitzen-Leistung</b>	3 kW	3.5/3.5 kW	1/1 kW	3.5/4 kW
<b>Wirkungsgrad (Nominal/Spitze)</b>	90-95% * 90% DC/DC	92/96%	90/96%	>90/95%
<b>Eingangsspannung (Auxiliary supply) ab Batterie</b>	Nein	Nein	8-16 Vdc	8 – 28 Vdc
<b>Maximaldrehzahl</b>	ca. 20 krpm	500 krpm	500 krpm	300 krpm
<b>Kommunikationsschnittstelle</b>	CAN	diverse	CAN	CAN
<b>Kühlung</b>	unbekannt	Luft, aktiv	Bodenplatte, max. 85°C	Bodenplatte, max. 60°C
<b>Schutzart</b>	IP67	-	IP67	IP67
<b>Vibration</b>	Getestet für automotive	Nicht getestet	Nicht getestet	Ausgelegt und vorbereitet für automotive Tests

Tabelle 2: Zielspezifikationen für eine Elektronik für ein 30 kW Brennstoffzellensystem.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Projekt wurden folgende Arbeitspakete abgearbeitet:

### Erstellen / Ergänzen der Spezifikationen

Die Spezifikationen (Spannungslevel Batterie, Brennstoffzelle, Kompressor; Leistungslimits; Startvorgang; Nennarbeitsbereich der Brennstoffzelle, etc.) wurden erstellt, bzw. in Absprache mit pot. Kunden / Industriepartnern genauer definiert. Die Resultate sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Herauszuheben sind:

- Die Versorgungsspannung variiert, aber in einem tieferen Bereich als bei Brennstoffzellensystemen kleinerer Leistung.
- Im Gegensatz zu Kompressor-Systemen für 5-15 kW Brennstoffzellen ist ein Start ab Batterie nicht mehr nötig, da die Eingangsspannung des Umrichters immer vorhanden ist. Diese

Spannung liegt konstant an, da sie für weitere Komponenten des BoP und des Antriebsstrangs benötigt wird. Dies vereinfacht die Wahl der Topologie und reduziert die Komplexität und damit den Aufwand auf Seite Kompressor-Umrichter.

- Eine Batteriespannung ist immer vorhanden. Dies reduziert die Komplexität und damit den Aufwand auf Seite Kompressor-Umrichter.

### Konzeptionierung der Elektronik

Bestehende Schaltungskonzepte von Celeroton wurden mit neuen Schaltungskonzepten verglichen und basierend auf den folgenden Kriterien bewertet:

- Die definierten Spezifikationen können mit der Topologie erreicht werden
- Wirkungsgrad
- Leistungsdichte
- Anzahl und Kosten der Bauteile
- Komplexität und Reproduzierbarkeit des Zusammenbaus.

Das Resultat ist die Wahl einer PAM Umrichter Topologie (DC/DC Tiefsetzsteller plus direkte 2-level, 3-phasen Wechselrichtertopologie), wie sie auch in anderen Umrichtern von Celeroton zum Einsatz kommt, jedoch in einer Spezialausführung mit weitem Eingangsspannungsbereich und davon entkoppelten Ausgangsspannungsbereich. Daher ist der Drehzahlbereich von der Eingangsspannung entkoppelt, gezeigt in Abbildung 3.

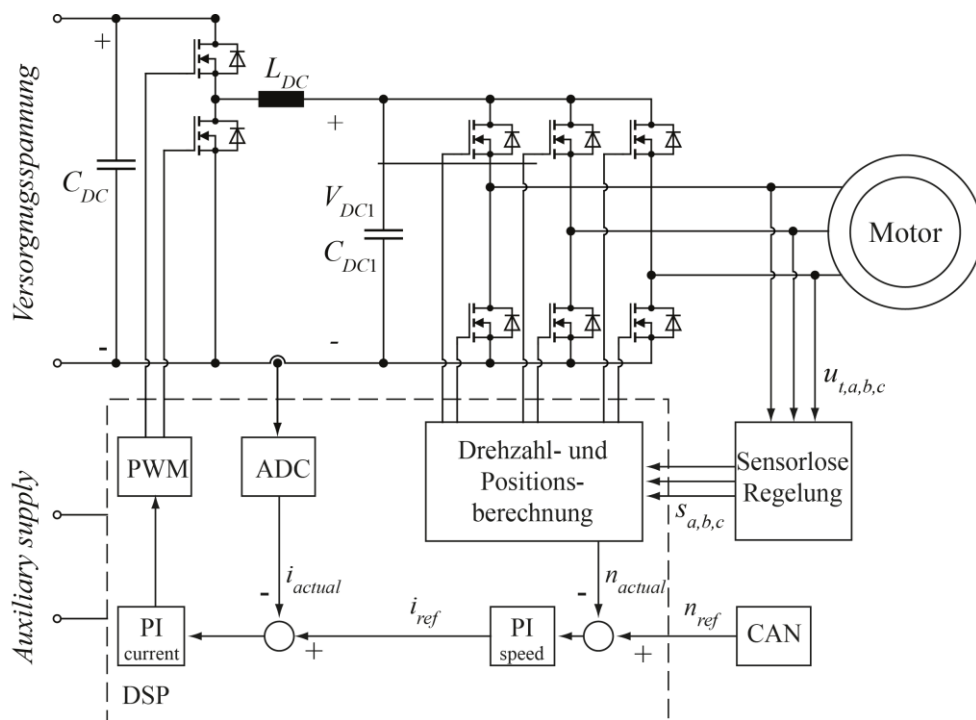


Abbildung 3: Resultierende Schaltungstopologie.

### Detailauslegung

Die folgenden Aufgaben wurden während der Detailauslegung durchgeführt:

- Schema und Layout der Elektronikplatine
- Auslegung des Gehäuses
- Implementierung der Firmware

## I. Aufbau des Prototypen

Basieren auf der Detailauslegung wurde ein Prototyp der Elektronikplatine aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Der Prototyp-Umrichter mit Dimensionen (LxBxH) 253 x 190 x 79 mm ist in Abbildung 4 dargestellt. Beim Betrieb im Nennarbeitspunkt wurde ein Wirkungsgrad von 93% erreicht, womit auch das zweite Projektziel (Gesamtwirkungsgrad grösser 90%) erreicht wurde.



Abbildung 4: Prototyp-Umrichter.

## Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

Die gesteckten Ziele des Projektes wurden erreicht. Bei der Durchführung des ersten Arbeitspaketes (Spezifikationsphase/Wahl der Topologie) hat sich gezeigt, dass die Versorgungsspannung in einem tieferen Bereich als bei den anderen von Celeroton angebotenen Umrichtern für Brennstoffzellensysteme kleinerer Leistung variiert. Weiter ist im Gegensatz zu Kompressor-Systemen für 5-15 kW Brennstoffzellen ein Start ab Batterie nicht mehr nötig, da die Eingangsspannung des Umrichters immer vorhanden ist. Diese Spannung liegt konstant an, da sie für weitere Komponenten des BoP und des Antriebsstrangs benötigt wird. Die daraus resultierende vereinfachte Wahl der Topologie, sowie der Komplexität, wurde in diesem Projekt aufgezeigt. Die Vereinfachung der Topologie muss in der nachfolgenden Phase der Industrialisierung auch dazu führen, dass die Kosten der Elektronik auf ein kompetitives Niveau gesenkt werden können damit sich die Technologie der gasgelagerten Turbo Kompressoren mit dazugehöriger Elektronik am Markt durchsetzen kann, respektive dazu beiträgt, dass Brennstoffzellensysteme eine wirtschaftliche Chance haben und nicht länger Nischen-Dasein fristen.

## Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

### Schlussfolgerung

Die Resultate des Projektes haben gezeigt, dass für 30-50 kW Brennstoffzellen eine andere, vereinfachte Kompressor-Umrichter-Topologie als für 5-15 kW Brennstoffzellen ideal ist. Grund dafür ist, dass ein Start ab Batterie ist nicht mehr nötig ist, da die Eingangsspannung des Umrichters immer vorhanden ist. Ein kritischer Punkt im Projekt war die Erstellung der Spezifikationen, da noch kein Konsens vorhanden ist in Fachliteratur und unter den verschiedenen potentiellen Kunden von Celero-



ton bezüglich der Anbindung des Kompressor-Subsystems an verschiedene mögliche Spannungsniveaus. Die optimale Wahl hängt von der Konzeption des gesamten BoP ab, der Trend geht hier Richtung Betrachtung und Vereinfachung des gesamten BoP, wobei mit diesem Projekt ein Beitrag geleistet wird, dass diese Thematik vermehrt betrachtet und nicht nur Einzelkomponenten optimiert werden.

Zum Abschluss des Projektes wurde der Umrichter erfolgreich mit einem Kompressor in Betrieb genommen und die Performance validiert. Dabei konnte die erwartete Performance nachgewiesen werden. Als nächsten Schritt – im Anschluss an dieses Projekt – wird nun der Prototyp-Umrichter

## Ausblick

Im Anschluss an dieses Projekt, wird Celeroton den Prototyp-Umrichter in einem Brennstoffzellenprojekt mit einem Industriepartner einsetzen und testen. Basierend auf diesen Ergebnissen, sowie Tests bei weiteren Testkunden, wird Celeroton die Industrialisierung des Umrichters aufnehmen und eine Serienfertigung anstreben.

## Referenzen

- [1] B. Blunier, A. Miraoui, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications", Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010
- [2] W. Yu, X. Sichuan, H. Ni, "Air Compressors for Fuel Cell Vehicles: An Systematic Review," SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015.

## Anhang

Keine Anhänge